

平成 2 1 年度戦略的基盤技術高度化支援事業

「高速回転ツールを用いた鋳物の表面硬化技術の開発」

研究開発成果等報告書

平成 2 2 年 3 月

委託者： 近畿経済産業局
委託先： 国立大学法人大阪大学

第1章 研究開発の概要

1-1 研究開発の背景・研究目的及び目標

プレス金型や工作機械の摺動部、歯車等の鉄鋼部品では表面の硬さを増し、耐摩耗性等の特性を向上させる目的で、各種の表面硬化処理が施されており、このような処理は、部材の延命のためには必要不可欠である。

図1-1はプレス金型に対する主要25社の要望のアンケート結果であるが、金型に対する要望のほとんどが耐摩耗性の向上、熱処理の際の寸法変形およびそれに伴

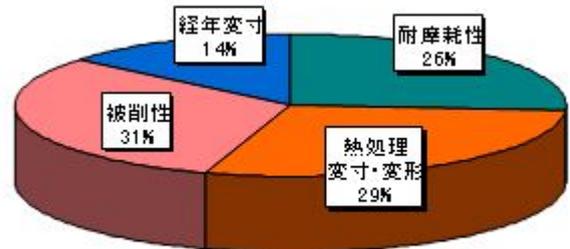


図1-1 主要25社のプレス金型に対する要望

う寸法補正のための被削性の問題となっている。したがって、変形を伴わずに、安定的に鑄鉄表面の硬度を上昇させる新しい硬化技術が強く望まれている。自動車産業の発展が著しい最近においては、プレス金型の需要は極めて大きく、上記の目標を達成すれば、その経済的効果は絶大である。

鉄鋼材料の表面硬化処理法としては、フレーム・ハードニング（火焰焼入れ）法、高周波焼入れ法、電子ビーム焼入れ法、レーザ焼入れ法、メッキ法、固体浸炭法、ガス浸炭法、液体浸炭法、窒化法などの手法がある。図1-2に示すフレーム・ハードニングはバーナーを用いてアセチレンガスと酸素ガスの火焰で被焼き入れ材の表面を所定の温度に加熱し、その後、急冷する焼入れ処理法である。フレームハードニングは特種な設



図1-2 フレームハードニング

備を必要としないが、人手による作業の場合、加熱温度を正確に制御できないため、均一な硬化層を得るには熟練を要するという欠点がある。したがって、工作機械の摺動部のような単純形状の被焼入れ材に対しては、非効率で不適とされている。

高周波焼入れは電磁誘導によって、高周波の渦電流を誘起させて発生する熱を利用して被焼入れ材を所定の温度に加熱し、その後、急冷する焼入れ方法である。渦電流を誘起させるための周波数、加熱コイルの材質や形状、冷却システムなどの被焼入れ材に応じて適切に組み合わせることによって焼入れ特性の調整を効率良く行うことができるという利点があるが、汎用性に乏しいという欠点がある。

電子ビーム焼入れやレーザー焼入れは、それぞれ電子ビーム、レーザーを用いて被焼入れ材を所定の温度に加熱し、その後、急冷する焼入れ法であり、自動化が可能であるという利点は有するものの、高価な設備を必要とし、中小企業における幅広い普及は困難である。また、レーザー焼入れの場合、金属の被焼きれ材がレーザーを反射してしまうため、被焼入れ材の表面に黒鉛などの吸収剤を塗布する等の面倒な作業を施さなければならないという欠点がある。

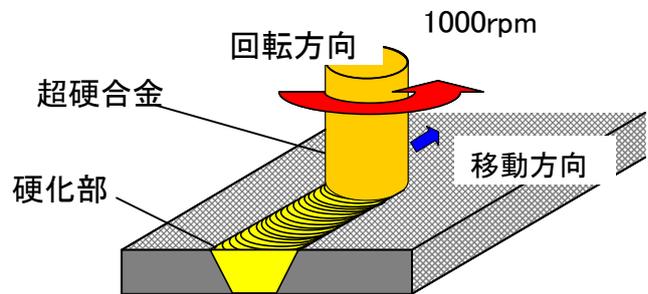


図1-3 新表面硬化法の原理

そこで本研究開発では、上記のニーズに対応し、図1-3に示す摩擦熱を利用した新表面硬化法を開発する。高速で回

転する円柱状の工具を鋳鉄表面に押し当て、移動させることにより、局部的に摩擦熱を発生させ、表面を硬化させる。表面硬度が母材の4倍で、従来の火焰焼き入れ等のHRC50（513HV相当）を上回る800HV以上になる表面硬化層を形成させる。

尚、川下製造業者の抱える課題及び要請（ニーズ）としては以下の項目が挙げられる

(1) 自動車に関する事項

ア．高強度化、 カ．低コスト化 ク．環境配慮

(2) 工作機械に関する事項

ア．高強度化、 オ．低コスト化、 キ．環境配慮

(3) その他産業に関する事項

ア．高強度化、 オ．低コスト化、 ク．環境配慮

一方、高度化目標としては、以下の項目を挙げられる。

(1) 自動車に関する事項

- ア．耐摩耗性の向上に資する鋳造技術の開発
- シ．品質の確保及び向上に資する鋳造技術の開発
- ス．コスト低減に資する鋳造技術の開発
- セ．短納期を実現するための鋳造技術の開発
- ソ．環境配慮に資する鋳造技術の開発

(2) 工作機械に関する事項

- イ．耐摩耗性の向上に資する鋳造技術の開発
- キ．表面焼入れ等の熱処理に対応可能な鋳造品を開発するための技術
- コ．品質確保および向上に資する鋳造技術の開発
- サ．コスト低減に資する鋳造技術の開発

- シ．短納期を実現するための鑄造技術の開発
- ス．環境配慮に資する鑄造技術の開発
- (4) その他の産業に関する事項
 - イ．摺動特性の向上に資する鑄造技術の開発
 - ク．品質の確保および向上に資する鑄造技術の開発
 - ケ．コスト低減に資する鑄造技術の開発
 - コ．短納期を実現するための鑄造技術の開発
 - サ．環境配慮に資する鑄造技術の開発

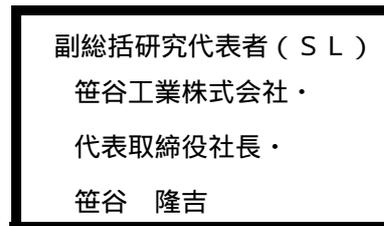
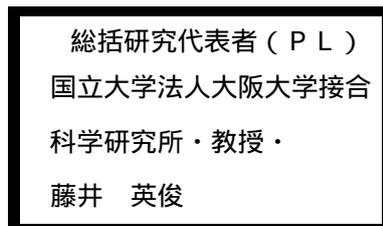
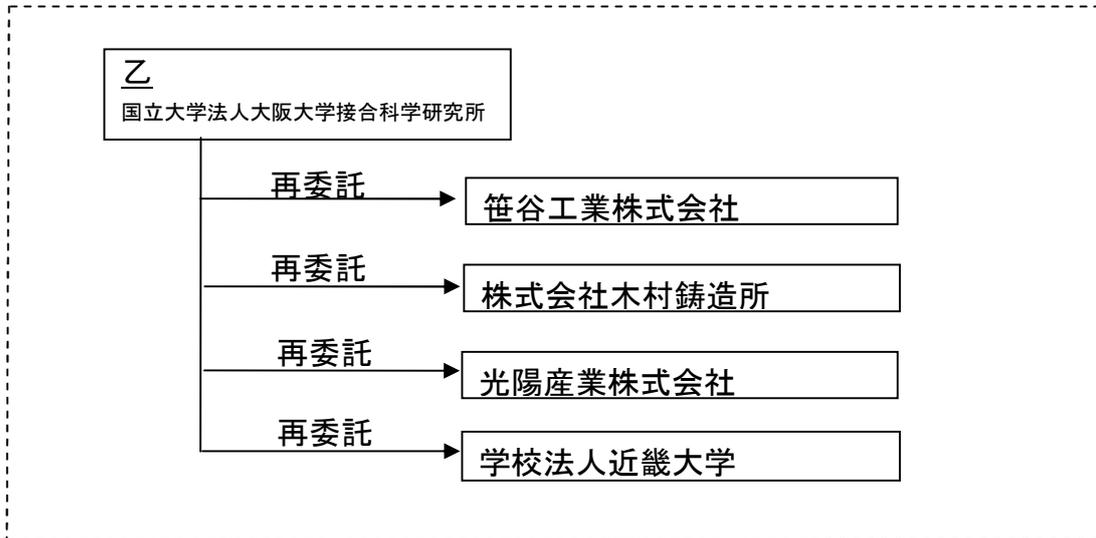
上記の高度化目標を達成するためには、従来とは全く異なった表面硬化技術の確立が不可欠である。まず、耐摩耗性を向上させるためには、火焰焼入れ法などの従来法より高い硬度が得られる必要がある。さらに、コスト低減、短納期を想定すると安定的にそのような優れた特性が得られ、かつ、自動化出来る技術が要求される。また、表面硬化プロセス中において鑄物構造物が変形することにより2次加工が必要となることが、大幅に作業効率を低下させている現状を考慮すると、可能な限り低入熱で表面を硬化させる技術を確立する必要がある。

そこで本研究開発では、上述の高度化目標を達成するため、図1-3に示す、摩擦熱を利用した新表面硬化法を開発する。15~25程度の円柱状の工具を高速で回転する円柱状の工具を鑄鉄表面に押し当て、移動させることにより、局部的に摩擦熱を発生させ、表面を硬化させる。この時、局所的な加熱に限られ、周囲の温度上昇は抑制されるため、安定かつ大きな冷却速度が達成でき、極めて微細なマルテンサイト相を形成させることができる。その結果として、表面硬度が母材の約4倍で、従来のフレームハードニング(HRC50 (513HV 相当))を大幅に上回る800HV以上になる表面硬化層を形成させ、耐摩耗性を大幅に向上させる。また、火焰等の環境に適さない手法を用いることなく作業が行えるとともに、構造物の熱変形を従来の1/5以下に抑制できる。この手法を大型鑄物へ適用し、後処理が不要あるいは極めて少ない自動化されたプロセスを構築する。

1 - 2. 研究体制

(1) 研究組織及び管理体制

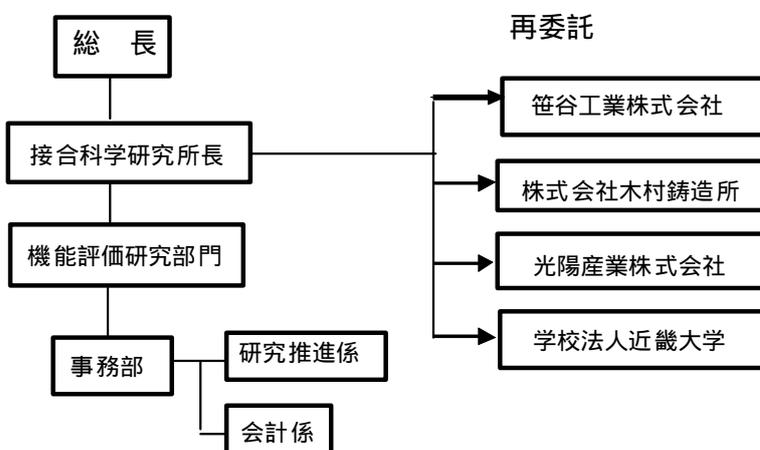
1) 研究組織(全体)



2) 管理体制

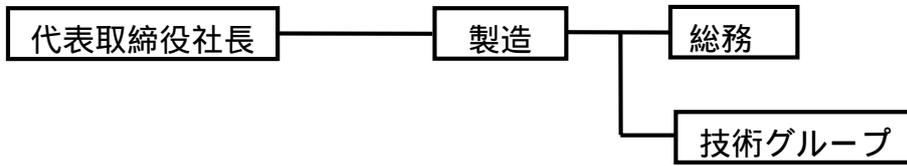
① 事業管理者

[国立大学法人大阪大学接合科学研究所]

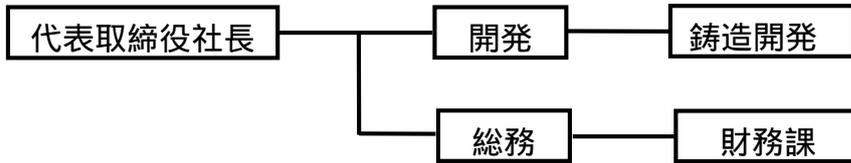


②(再委託先)

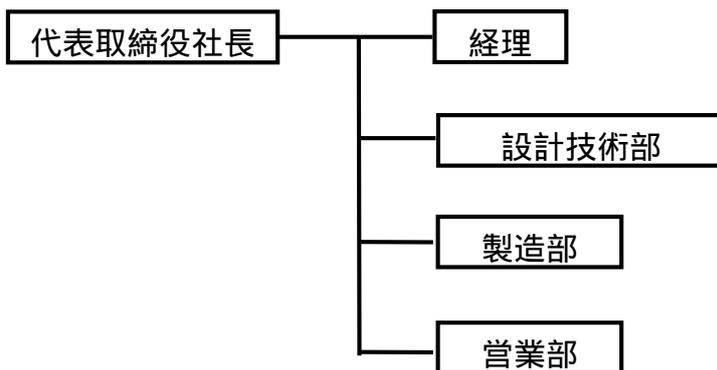
笹谷工業株式会社



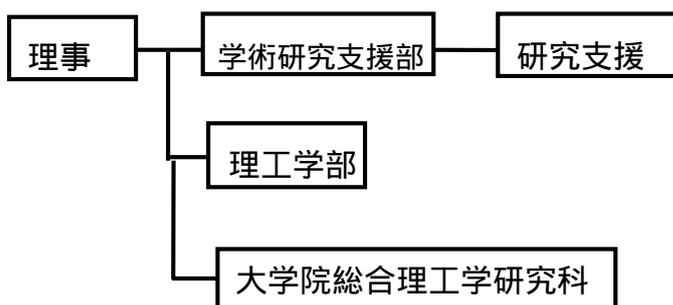
株式会社木村鋳造所



光陽産業株式会社



学校法人近畿大学



(2) 管理員及び研究員

【事業管理者】 国立大学法人大阪大学

管理員

中田 一博	接合科学研究所・所長
佐々木 信隆	接合科学研究所・事務長
黒杭 裕	接合科学研究所研究推進係・係長

研究員

藤井 英俊	接合科学研究所・教授
津村 卓也	接合科学研究所・助教

【再委託先】

笹谷工業株式会社

笹谷 隆吉	代表取締役社長
吉沢 哲男	製造部・部長
井川 光生	製造部・主幹
片岡 仁志	製造部・部員
加賀谷 孝幸	製造部・部員

株式会社木村鋳造所

菅野 利猛	開発部・部長
福田 葉椰	開発部・課長
林 健一	開発部・部員
小林洋平	開発部・部員

光陽産業株式会社

片山 順靖	専務取締役
加藤 奉美	設計技術部・部長
坂本 幸男	設計技術部・部員

学校法人 近畿大学

木口 昭二	理工学部・教授
-------	---------

(3) 経理担当者及び業務管理者の所属、氏名

(事業管理者)

国立大学法人大阪大学接合科学研究所

(経理担当者)	岡本 征子	会計係主任
(業務管理者)	黒杭 裕	研究推進係係長

(再委託先)

笹谷工業株式会社

(経理担当者)	上田 章子	総務部
(業務管理者)	吉田 英毅	常務取締役 総務部長

株式会社木村鋳造所

(経理担当者)	田辺 顕一	総務部 財務課長
(業務管理者)	菅野 利猛	開発部長

光陽産業株式会社

(経理担当者)	喜多 明	代表取締役
(業務管理者)	片山 順靖	専務取締役 製造部

学校法人近畿大学

(経理担当者)	山田 英治	学術研究支援部研究支援課
(業務管理者)	祝原 豊	学術研究支援部 部長

1 - 3 成果概要

高速回転機能を備えた鋳物及び鋼材の表面硬化装置の設計・開発

光陽産業が中心となり、笹谷工業および木村鋳造所の要望をもとに、円筒形状では600の直径まで、角形構造物では、1000×1000×300(mm)の大型構造物の表面硬化が達成

可能な装置の開発を行った。表面改質中のモータトルクを一定制御方式およびレーザ変位センサを導入し、正確なツール位置を把握できるように装置の改良を行った。円筒鋳物に対しては、直径を 300 までに限定することにより、1 / 100 の精度で制御できるパイプ硬化システムも構築し、同時に、薄肉円筒鋳物の表面改質も可能にした。また、大阪大学に現存の接合装置と組み合わせることにより、目的の実験が行えるような装置開発した。

(達成度：予定を上回った成果が得られた)

円筒鋳物の表面硬化技術の開発 (笹谷工業株式会社、国立大学法人大阪大学)

パーライト系鋳鉄 (FC300、FCD700) およびフェライト系球状黒鉛鋳鉄 (FCD450) 対象材料とし、実構造物大である 300 × 1000 の円筒形状に適用可能な手法を確立した。改質部の硬度を従来のフレームハードニング (HRC50 ~ 58 (513 ~ 653HV 相当)) を大幅に上回る 800HV 以上の硬度が得られ、プロセスによる鋳物構造物の変形はほとんど見受けられなかった。硬化部の最適な配置に関しては、実用化を目指して、スパイラル状に硬化層を形成する場合を中心に表面を部分的に硬化させる手法を確立した。

(達成度：予定通りの成果が得られた)

角形 (平板) 鋳物及び鋼材の表面硬化技術の開発 (株式会社木村鋳造所、国立大学法人大阪大学)

対象材として、パーライト系片状黒鉛鋳鉄 (FC300) および球状黒鉛鋳鉄 (FCD400) に対して硬化実験を行った。プロセス条件の最適化に関しては、工具の直径、回転速度、移動速度、荷重などのパラメータについて検討し、硬度および硬化層の厚さに対して最適化を図った。これまで、本硬化処理において、表面のへこみが問題となっていたが、前進角を小さくすることで大幅に改善し、目標の硬度 800HV および硬化層の厚さ 1mm を達成した。

硬化部位の評価は、試験片を 30mm × 30mm の大きさに切り出し、大越式耐摩耗試験機を用いて行った。荷重 125N , 摩耗距離 200m、回転速度 0.946 ~ 3.652 の範囲で未処理材と硬化材を比較し、耐摩耗性がどの程度向上するか測定した。その結果、FC300 および DCD400 とともに本硬化処理を行うことで、低速度域における耐摩耗性が向上し、一般に耐摩耗材としている SKD11 と同程度の耐摩耗性を有していることが明らかとなり、本手法により、工作機械の摺動部など、耐摩耗性が必要とされる部位に実用可能であるという結論を得た。

(達成度：予定通りの成果が得られた)

安定的な特性を得るためのメカニズムの解明（光陽産業株式会社、学校法人近畿大学、国立大学法人大阪大学）

硬化のメカニズムを解明するために、市販品としては存在しないフェライト系片状黒鉛を作製し、硬化実験を行い、他の材料と同様に硬化できることを明確にした。3年間で得られた知見を統合することにより、球状黒鉛鋳鉄、片状黒鉛鋳鉄、パーライト系黒鉛鋳鉄、フェライト系黒鉛鋳鉄のそれぞれの鋳鉄における、表面硬化のメカニズムを明確にし、その結果をもとに、安定的に高い硬度が得られるよう、プロセスの最適化をした。

（達成度：予定以上の成果が得られた）

実物大構造物での試験（笹谷工業株式会社、株式会社木村鋳造所、光陽産業株式会社、学校法人近畿大学、国立大学法人大阪大学）

円筒鋳物の場合には、340×1000mmの大型鋳物、角型鋳物の場合には、600×450×150mmの鋳物を作製し、それぞれの摺動部の表面硬化を行い、球状黒鉛鋳鉄、片状黒鉛鋳鉄あるいはパーライト系鋳鉄、フェライト系鋳鉄を問わず、表面硬度を安定的に800HVの硬度で厚さが1mm以上の硬化層を得る技術を確立した。それぞれ、円筒鋳物は笹谷工業、角型鋳物は木村鋳造所が主担当として行った。

（達成度：予定通りの成果が得られた）

プロジェクトの管理・運営（国立大学法人大阪大学）

大阪大学がプロジェクトの管理・運営を行った。5つの参加機関が機能的に連携し、各サブテーマにおいて効率的なプロジェクトの運営を行うことで、最大の成果が得られた。これは、研究推進委員会の他にも各機関の個別の打ち合わせ等を行うことにより、緊密な情報交換を推進させた結果である。

以上のように、3年間を通じて、各項目とも十分に目標を達成し、特にフェライト系鋳鉄に本手法が適用可能であることなど実用的にも非常に有用な知見が得られた。

1 - 4 プロジェクト連絡窓口

〒567-0047 大阪府茨木市美穂ヶ丘11番1号

国立大学法人大阪大学接合科学研究

庶務係 中村 清志

第 2 章 円筒鋳物の表面硬化技術の開発、実物大構造物での試験

2 - 1 目的

鋳鉄に硬質クロムめっきを 0.03~0.05mm 施すと、硬質クロムめっきは硬度が 900HV 以上で耐磨耗性も良好であるが、電気めっきのため炭化物のように抵抗値が特異的に大きなところは一般につきにくく、摺動を繰り返すと析出した黒鉛の上に乗っているメッキが剥がれ、部品にキズが発生してしまうという不具合が発生している。そこで本研究開発では、図 1 - 3 に示す摩擦熱を利用した新表面硬化法で表面硬化処理を実現させることを目的としてきた。

この手法を用いることで、表面硬度がクロムめっきと同等の 900HV 以上で、硬化深さが 0.03~0.05mm を上回る 1.5mm 以上になる表面硬化層を形成させることなど魅力的な特徴を有する。また、パーライト系片状黒鉛鋳鉄 (FC300) のみならず、図 2 - 1 に示すように、球状黒鉛鋳鉄 (FCD450) とともに表面硬度が 900HV で深さが 0.5mm 以上の硬化層を得られることを明らかにしてきた。

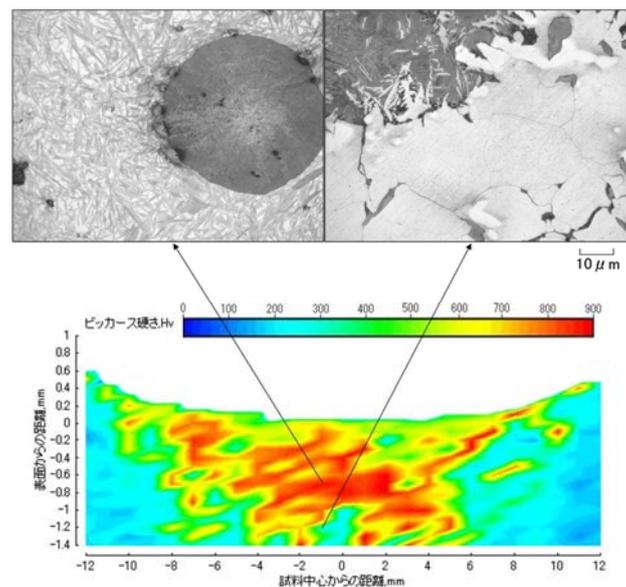


図 2 - 1 球状黒鉛鋳鉄 (F C D 450) の実験結果

また、最終的に実物大である 340mm × 1000mm、厚み 60mm の円筒鋳物 (FC300, FCD450) に対して実験を行った。

2 - 2 試料および接合方法

図2 - 2 に示す円筒鋳物硬化装置を用いて実験を行った。本装置は、冷却水を循環させることによる装置の冷却、アルゴンシールドガスによる表面硬化処理中の雰囲気制御が可能である。表面硬化処理は図2 - 3 に示すように、ツールと呼ばれる円柱状の工具の高速で回転させながらその底面を材料に押しあて、そのときに発生する摩擦熱によって硬化処理を行った。



図2 - 2 円筒鋳物硬化装置

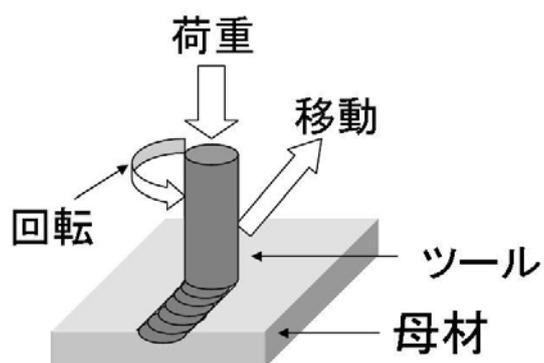


図2 - 3 表面硬化処理

パーライト系片状黒鉛鑄鉄（FC300）およびフェライト系球状黒鉛鑄鉄（FCD450）を対象材料とし、実物大である 340mm×1000mm、厚み 60mm を作製した。パーライト系片状黒鉛鑄鉄（FC300）およびフェライト系球状黒鉛鑄鉄（FCD450）の化学的性質、機械的性質、組織写真を表 2 - 1 ~ 4、図 2 - 4 , 2 - 5 にまとめて示す。

表 2 - 1 パーライト系片状黒鉛鑄鉄（FC300）の化学成分（％）

C	Si	P	S
3.22	1.64	0.019	0.017

表 2 - 2 パーライト系片状黒鉛鑄鉄（FC300）の機械的性質

引張強さ（N/mm ² ）	ブリネル硬度（HB）
326	217

表 2 - 3 フェライト系球状黒鉛鑄鉄（FCD450）の化学成分（％）

C	Si	P	S
3.80	2.19	0.017	0.009

表 2 - 4 フェライト系球状黒鉛鑄鉄（FCD450）の機械的性質

引張強さ（N/mm ² ）	耐力（N/mm ² ）	伸び（％）	ブリネル硬度（HB）
326	288	18	168

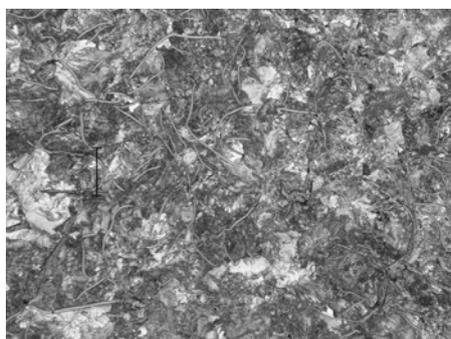


図 2 - 4 パーライト系片状黒鉛鑄鉄（FC300）の微細組織

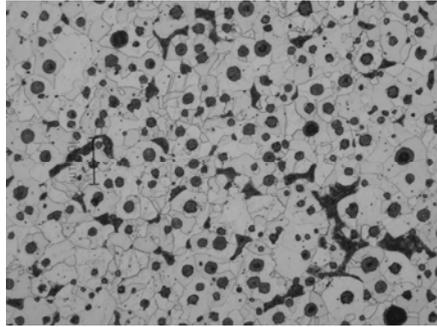


図 2 - 5 フェライト系球状黒鉛鋳鉄 (FCD450) の微細組織

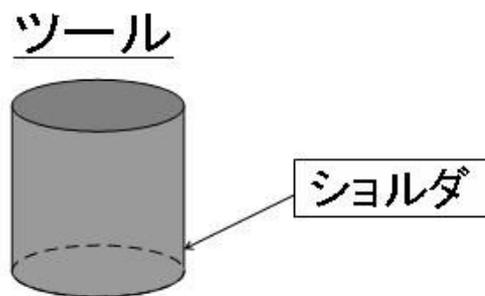


図 2 - 6 ツール形状

表面硬化処理は、スパイラル状に硬化処理を行った。実験パラメータは、前進角、工具の移動速度、工具回転速度とし、評価項目は、硬化部の表面硬度及び硬化部(組織変態部)の厚さとした。使用したツールの材質は超硬合金、形状は図 2 - 6 に示すように 25 の円柱形状とした。

2 - 3 工具の移動速度、工具回転速度の条件と特性評価方法

表面硬化のための適正条件を図 2 - 7 に示す。図中の直線の傾きは入熱量(温度)に相当するが、フェライト系鋳鉄 FCD450 の適正範囲がパーライト系のそれと比較すると、高温側に存在するのが明かとなった。

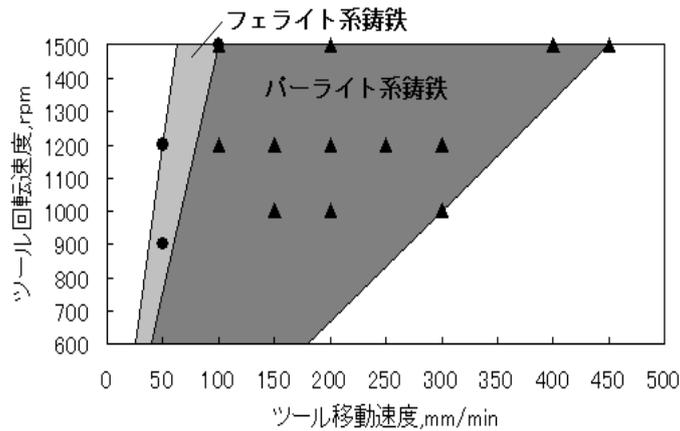


図 2 - 7 荷重 5 t 前進角 3 度での適正条件範囲

試料を切断後、熱間樹脂で樹脂埋めし、研磨、バフ琢磨を行った後、3%ナイトール液によって腐食させ、光学顕微鏡によって組織観察を行った。

試料の研磨法は、上記のように試料を切断し、熱間樹脂埋めを行った後、手研磨により、エメリー紙#400、#600、#800、#1000、#1500で研磨し、さらに粒度6 μ mのダイヤモンドペーストを用いて、バフ琢磨を行った。ダイヤモンドペーストを使用した際の研磨布はStruers製Code: #101、研磨液はStruers製DP-ループリカントとした。

表面硬化処理後の試料に対して、明石製作所製AAV-500を用いてビッカース硬さ試験を行った。試料にツールが一番深く入った点を原点と定め、ツール径25mmのツールを使用したことから、圧痕間隔は試料表面より0.1mmごとで、中心から左右それぞれ12mmの地点まで1.0mmごとに、荷重を1.961N、圧子保持時間を15秒として測定した。ただし、圧子が試料中の黒鉛を測定していた場合は、x軸方向に0.15mm程度測定部分をずらし、再度、測定を行った。

2 - 5 硬度分布

各硬化処理条件におけるパーライト系片状黒鉛鑄鉄の硬さ分布図を図2 - 8 ~ 2 - 9に示す。1500rpm-135mm/min、1750rpm-140 ~ 175mm/minの試料で広範囲で硬化していることが確認できた。

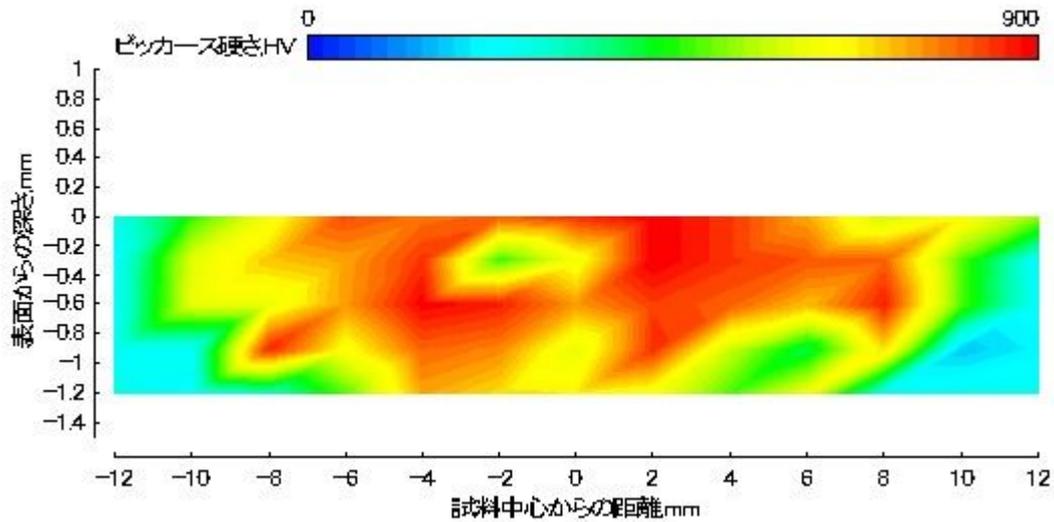


図 2 - 1 1 1500rpm 135mm/min 条件下でのピッカース硬さ分布

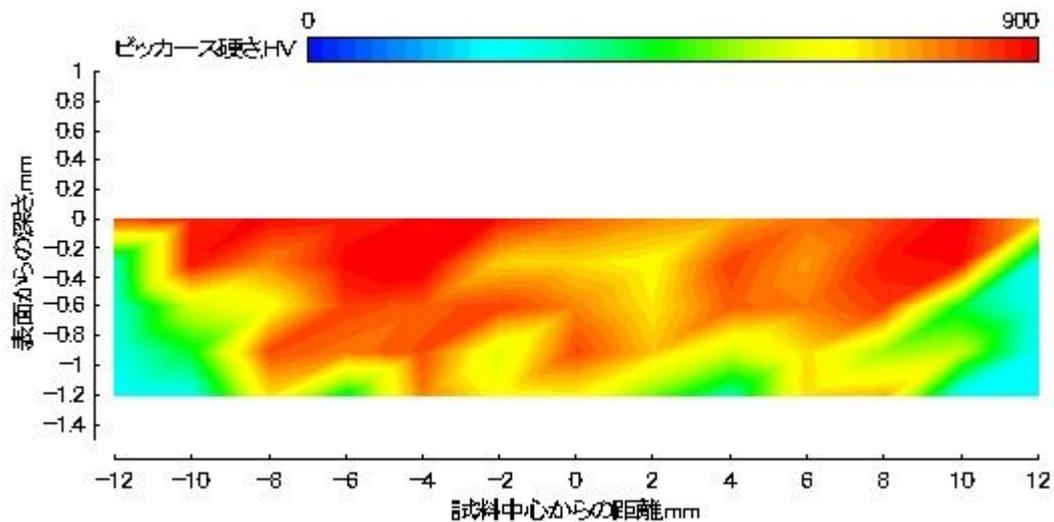


図 2 - 1 2 1750rpm 140mm/min 条件下でのピッカース硬さ分布

2 - 8 まとめ

本実験において、以下のことが明らかとなった。

- (1) 本手法を用いて、 $340 \times 1000\text{mm}$ の実物大円筒鋳物構造物においても、表面硬化が可能である。また、得られる硬度も 800HV 以上であり、従来のフレームハードニング($\text{HRC}50 \sim 58$ ($513 \sim 653\text{HV}$ 相当))を大幅に上回る。
- (2) 前進角を小さくすることにより、表面処理部のへこみを小さくすることが可能で、精度の良い表面硬化処理を行うことができる。

第3章 角型鋳物の表面硬化技術の開発、実物大構造物での試験

3 - 1 試験用鋳物の作製

一般的な摺動部を持つ工作機械を想定した鋳物を作製することを目的とし、図3 - 1に示すような大型鋳物を製作した。コンセプトとしては、実物大鋳物に見立て、2つの摺動部を持つ鋳物とし、摺動部の大きさは、一般的な工作機械に合うサイズとした。具体的なサイズは600×450×150mmで、重量は240kgである。材質として、実用化を考え、一般的な工作機械の材質を選定し、パーライト系片状黒鉛鋳鉄（FC300相当）とフェライト系球状黒鉛鋳鉄（FCD400相当）とした。

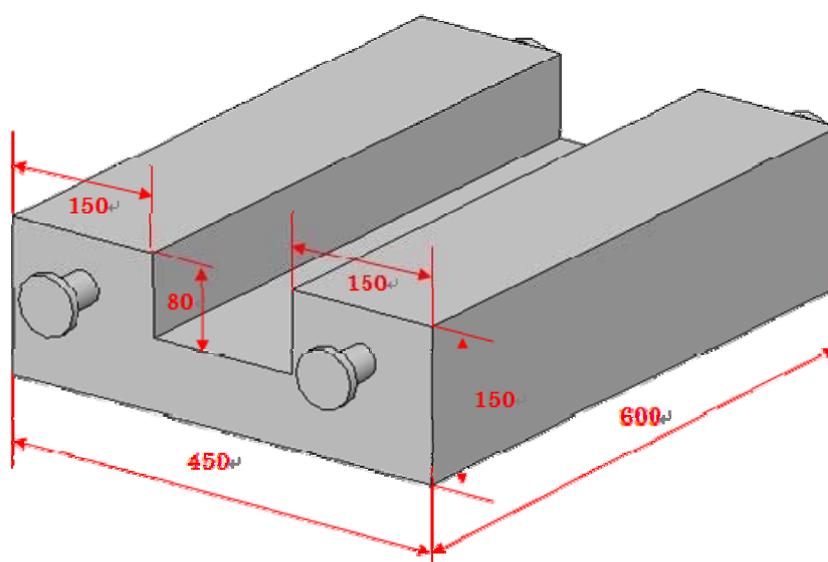


図3 - 1 模型寸法図

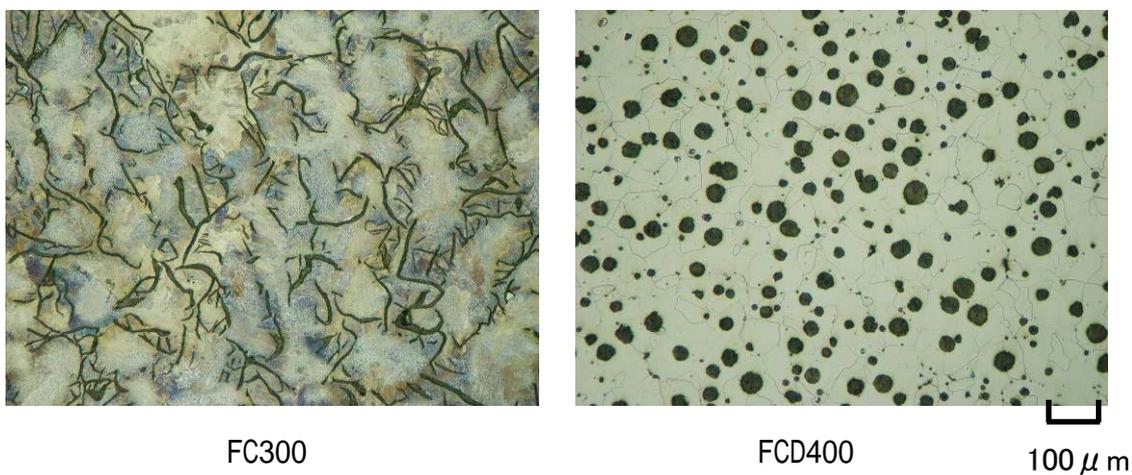
製造方法としては、フルモールド鋳造法を採用し、PMMA（ポリメチルメタクリレート）製の模型を用いた。注湯温度はそれぞれの材質に対して、1417（FC300）、1393（FCD400）とした。また、摺動部を10mm表面加工して、供試体とした。得られた供試体の成分は表3 - 1、3 - 2、微細組織は図3 - 2に示す通りである。尚、硬化処理前の供試体の硬度は、パーライト系片状黒鉛鋳鉄（FC300）がHB192、フェライト系球状黒鉛鋳鉄（FCD400）がHB146であった。

表 3 - 1 FC300 の成分分析値, %

C	Si	Mn	P	S
3.15	1.60	0.77	0.078	0.049

表 3 - 2 FCD400 の成分分析値, %

C	Si	Mn	P	S	Mg
3.60	2.60	0.20	0.016	0.009	0.052



FC300

FCD400

100 μ m

図 3 - 2 実物大試料の組織写真（表面硬化処理前）



図 3 - 3 試料設置の様子

3 - 2 ビッカース硬さおよび耐摩耗性の評価

研磨を行った観察面の組織を光学顕微鏡により観察し、マイクロビッカース硬度計を用いて硬度を測定した。マルテンサイト層の硬度は、安定してHV800 近くであった。

表面硬化処理された試料が優れた耐摩耗性を有し、工作機械の摺動部などに実用可能であることを確認するため、以下の5つの試料に対して、大摩耗性の試験を行った。

(試験試料)

表面硬化処理した FC300 HV800

表面硬化処理していない FC300 HV200

表面硬化処理した FCD400 HV730

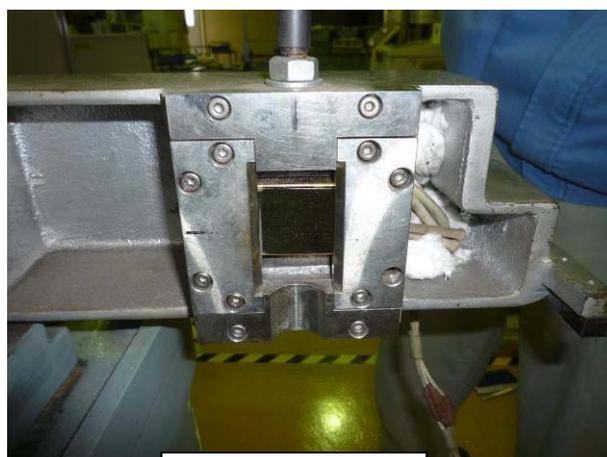
表面硬化処理していない FCD400 HV150

SKD11 焼き入れ材 HV800

ビッカース硬度は測定位置によるバラツキがあるため、概値とした。



相手材



試料をセットする



相手材に試料を押しつける



錘を乗せて荷重をかける

図 3 - 4 大越式摩擦摩耗試験機

卓上研磨機により試験面を #600 まで研磨後、アルミナ研磨剤を用いてバフ琢磨を行った。その後、アルコールで表面の汚れを拭き取った。尚、表面硬化処理をしたものは、FC300 も FCD400 も未処理のものと比較すると研磨紙の消耗が激しく、通常の研磨よりも格段に作業性が悪かった。このことから、表面硬化処理をすることで耐摩耗性が向上していることが実感された。

耐摩耗試験は、大越式摩擦摩耗試験機を用いて実施した。大越式摩擦摩耗試験の原理は、回転円板（相手材）を平板試験片に押し付けて摩耗させ、その時の摩耗痕の大きさから比摩耗量を求める。ギア比によって移動速度（回転速度）および移動距離が可変で、さらに錘によって押し付け荷重を変化させることが可能である。表 3 - 3 に相手材を SNCM440 として行った耐摩耗性試験結果を示す。

$$W_s = B b^3 / 8 r P l$$

W_s : 比摩耗量 ($\text{mm}^3 / \text{N}\cdot\text{mm}$)

r : 相手材の半径(mm)

P : 荷重(N)

l : 摩耗距離(mm)

比摩耗量の計算式

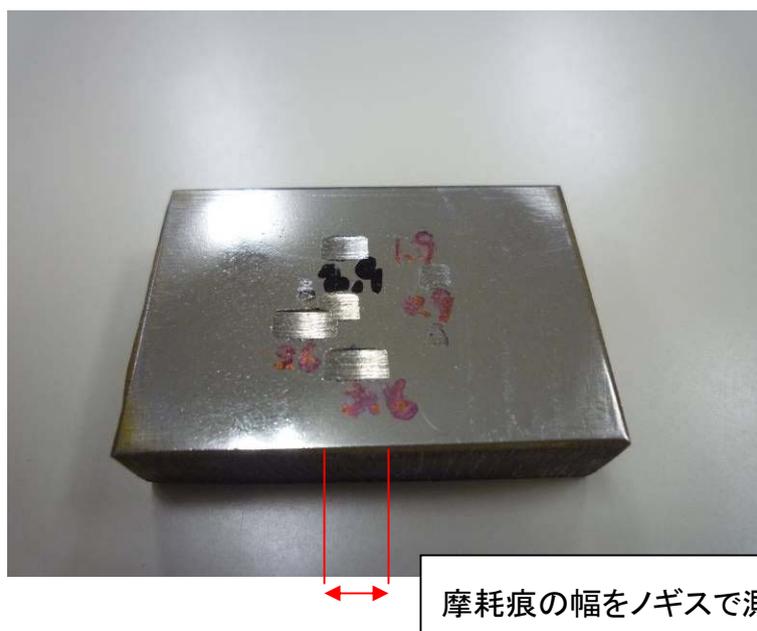


図 3 - 5 摩擦摩耗試験後の試料の摩耗

表 3 - 3 各試料の試験条件と結果

試料	速度	時間	相手材 の直径	痕幅	荷重	比摩耗量
	m/s	s	mm	mm	N	mm ³ /N・mm
FC300 表面硬 化処理	3.652	27.9	29.62	6.00	105	5.11 × 10 ⁻⁷
	2.932	34.7	29.76	4.85	105	2.69 × 10 ⁻⁷
	1.978	51.5	29.70	3.25	105	8.11 × 10 ⁻⁸
	0.946	107.1	29.67	1.50	105	8.02 × 10 ⁻⁹
FC300	3.652	27.9	29.65	6.50	105	6.50 × 10 ⁻⁷
	2.932	34.8	29.81	6.00	105	5.07 × 10 ⁻⁷
	1.978	52.4	29.72	5.75	105	4.41 × 10 ⁻⁷
	0.946	109.2	29.69	12.75	105	4.83 × 10 ⁻⁶
FCD400 表面硬 化処理	3.652	28.6	29.51	5.50	105	4.05 × 10 ⁻⁷
	2.932	34.3	29.46	5.05	105	3.26 × 10 ⁻⁷
	1.978	51.0	29.48	4.05	105	1.68 × 10 ⁻⁷
	0.946	105.7	29.47	1.05	105	2.95 × 10 ⁻⁹
FCD400	3.652	28.2	29.56	8.50	105	1.51 × 10 ⁻⁶
	2.932	34.5	29.49	10.00	105	2.51 × 10 ⁻⁶
	1.978	51.8	29.45	10.05	50	5.05 × 10 ⁻⁶
	0.946	103.3	29.48	11.55	20	2.01 × 10 ⁻⁶
SKD11 焼入れ 材	3.652	54.8	29.58	7.00	125	3.48 × 10 ⁻⁷
	2.932	68.5	29.58	6.00	125	2.18 × 10 ⁻⁷
	1.978	98.8	29.23	5.30	125	1.56 × 10 ⁻⁷
	0.946	206.1	29.23	5.00	125	1.31 × 10 ⁻⁷

表 3 - 3 を元に、各種試料の移動速度と比摩耗量の関係についてグラフで示すと、3 - 6、7 の様になる。これらの結果から、特に、1m/s 付近では、表面硬化処理された試料は耐摩耗性に優れていることがわかる。FCD400 の表面硬化処理未処理のものは、2m/s 以上においても耐摩耗性が他より劣る。

また、焼き入れ材だけを抜粋すると、図 3 - 7 に示すように、表面硬化処理した試料は、1m/s 付近において SKD11 焼入れ材よりも優れた耐摩耗性を示している。

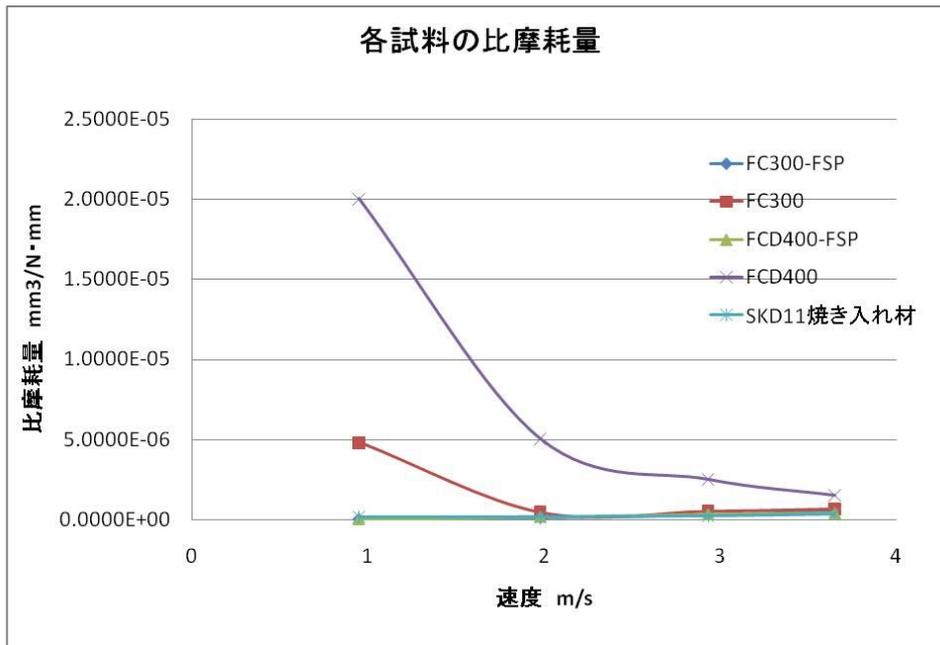


図 3 - 6 各種試料の比摩耗量比較

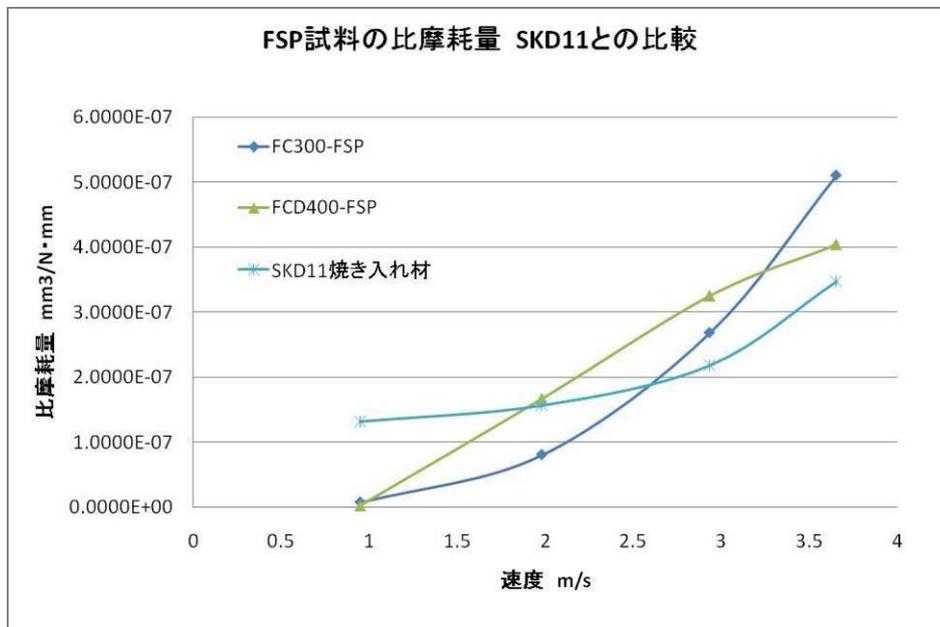


図 3 - 7 焼き入れ材同士の比摩耗量比較

3 - 8 まとめ

本年度の研究開発によって、以下の点が明らかとなった。

- (1) 600×450×150mm、重量は240kgの実物大鋳物においても、表面硬化が可能であり、パーライト系鋳鉄（FC300相当）およびフェライト系鋳鉄（FCD400相当）の両方に対して有効である。
- (2) FC300、FCD400共に表面硬化処理をすることで、800HVで厚さ1mmの硬化層が形成し、低速度域における耐摩耗性が向上する。これらは耐摩耗材として一般に使用されているSKD11と同等の耐摩耗性を有している。
- (3) FC300、FCD400共に1m/s以下の速度で、表面硬化処理材の耐摩耗性が大幅に向上した。工作機械の摺動部と考えると、加工機が摺動面を移動する速度は今回のテスト結果よりも低速域で行われるため、表面硬化処理は極めて有用であると考えられる。

第4章 全体総括

平成19年度～21年度にかけて行った本プロジェクトにおいて、最終的には、円筒鋳物に対しては、340 mm×1000 mm、厚み60 mm、角型鋳物に対しては、600 mm×450 mm×150 mmで、重量は240 kgの実物大鋳物の表面改質を行い、本手法がこれらの大型構造物に対しても有効であることを示した。いずれの場合においても、ほとんど変形の無い状態で、従来のフレームハードニング(HRC50～58 (513～653HV相当))を大幅に上回る800HV、硬化深さ1 mmが得られ、本プロジェクトの目標を達成した。

また、硬化のメカニズムを解明するために、通常、市販品としては存在しないフェライト系片状黒鉛を作製し、この材料に対する硬化実験も行った。これにより、パーライト系片状黒鉛鋳鉄、パーライト系球状黒鉛鋳鉄、フェライト系球状黒鉛鋳鉄、フェライト系片状黒鉛鋳鉄のすべてに対して、硬化が可能であることを示した。また、硬化した試料表面の耐摩耗試験を実施し、耐摩耗材として一般に使用されている鋼材であるSKD11と同等の耐摩耗性を有しているという、画期的な結果を示した。

本手法における、硬化のメカニズムは内部に微細なマルテンサイトを形成することにより、本手法が極めて局所的な加熱プロセスであるため、基地中への炭素の十分な拡散可能にする温度上昇と、その後の大きな冷却速度を同時に可能にするプロセスであることがこのような良好な特性の達成を可能にしている。

また、製品の用途によっては必要とする硬度がさまざまである。さらに、硬化後に表面の仕上げ加工をする場合にも、表面の硬度は高すぎない方がよい。これに関しては、硬化条件を制御することにより、表面近傍ではマルテンサイトとパーライトの混合組織とし、500HV程度の硬度に制御することが可能であることも結果として得られている。

本研究の成果の中で、特に、従来の方法では全く不可能であったフェライト系鋳鉄の表面硬化が可能であることが特筆に値する。この技術が着実に実用化されるよう、今後も、継続的に努力を行うことが望まれる。尚、本研究で得られた知見を活用して、光陽産業が他の戦略的基盤技術高度化支援事業へ装置を販売するなど、実用化面においてもすでに一部成果が得られている。